

学位論文題名

Study of Coupling between Monolithic II – VI
Semiconductor Microcavities and Self-Organized
Quantum Dots(モノリシック II – VI 族半導体微小共振器と
自己組織化量子ドットの結合状態に関する研究)

学位論文内容の要旨

光場-電子系の相互量子制御による新しい非線形量子光学現象及びそのデバイスへの応用に注目が注がれている。相互量子制御構造として代表的なものに微小光共振器がある。これは、その波長程度のサイズを持つ共振器中の光場と共振器内におかれた電子系との強い結合状態を引き起こす可能性を持つ。このとき励起子-光子の混成波として励起子ポラリトンが形成される。近年このような励起子ポラリトンに関して、低温で誘導放出を起こすことが量子井戸赤外発光層を用いた実験において確認され、励起子ポラリトンのボーズ凝縮モデルを中心とした議論が続いている。興味深いことにこの誘導放出における発振しきい値は、従来の面発光レーザの電子-正孔反転分布によるレーザ発振に比べ 1 桁以上も低いものであった。しかしながらこれまでの強い結合状態領域における相互量子制御の研究は、電子系を扱う半導体の励起子束縛エネルギーが小さいために、現象の観測が極低温に限られる、もしくは励起直後に自由キャリアによるスクリーニングが生じ励起子が解離し弱い結合状態に転じてしまうといった問題があった。

一方電子系を制御する新しい半導体低次元構造として、自己組織化量子ドット (QD) の研究が盛んに行われている。この QD はデルタ関数的な電子状態密度を有し、それを反映した μeV オーダーの非常に狭い発光均一線幅が単一 QD の発光として報告されている。このような共振器の共振線幅に比べはるかに鋭い発光線幅を持つ電子系を微小光共振器構造へ埋め込むと、これまでにない非常に強い結合状態を引き起こすものと考えられる。しかしながらこれまでの研究では、QD のサイズ分布によって発光線幅が広がり、弱い結合状態領域における研究にとどまっていた。

本論文では、半導体微小光共振器構造をワイドギャップ II-VI 族半導体で一体化して構成することを提案し、その検討を進めている。II-VI 族半導体は大きな励起子束縛エネルギー、振動子強度をもち、また多様な材料系のゆえ高い屈折率差を有するミラーの設計が可能である。しかしながらワイドギャップ II-VI 族半導体は高品質膜の成長が困難であることから、これまでモノリシックな微小光共振器構造は実現されていない。著者はまず、理論的に II-VI 族半導体微小共振器の可能性を探り、非常に強い光場を共振器内に閉じこめることが可能なことを示している。次に共振

器内に埋め込む II-VI 族半導体による自己組織化 QD 構造の成長を検討している。これにより QD の光学的、構造的性質を明らかにし、青-緑色の発光波長を持つ QD が成長可能なことを明らかにしている。一方光共振器構造においてその構造の大半の部分を占めるのが、半導体多層膜による分布ブラッグ反射鏡 (DBR) であり、DBR の高品質化がモノリシック成長の鍵となる。本論文では、半導体多層膜 DBR 中に超格子構造を組み込むことで、低歪み、高屈折率差の II-VI 族 DBR の成長が可能であることを示している。これら II-VI 族 DBR を用いたモノリシック光共振器構造では、明瞭な光共振器の共鳴ピークを青-緑色領域において初めて観測している。またこの共振器に自己組織化 QD を埋め込み、光学的特性について評価を行っている。ここでは不均一幅を持つ QD に対して光学フォノンによる共鳴選択励起を行い、QD の電子系と共振器光場の結合状態について議論している。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、半導体微小光共振器内での光場-電子系の相互作用状態について、両者の結合の強さの程度によって現れる物理現象の違いを理論的に解説する。また実験例をもとにした強結合状態の評価方法、ごく最近報告された新しい物理現象、量子ドットと微小光共振器との結合理論について紹介する。さらに II-VI 族半導体の屈折率分散を見積もり、微小光共振器材料として II-VI 族半導体の有利性を理論的に実証する。

第 3 章では、発光層として用いる II-VI 族自己組織化 QD の成長について検討している。青色発光材料として代表的な ZnSe QD の成長を行い、光学的、構造的特性を世界に先駆け明らかにしている。また非常に強い振動子強度を有することで古くから研究されている CdS の自己組織化 QD の成長に関しても検討している。

第 4 章では II-VI 族半導体多層膜による微小光共振器用 DBR の成長の検討を行っている。このとき ZnSe をベースに、歪みの低減、屈折率差の増加を検討しながら、成長、評価を進めている。天然では岩塩構造として存在する MgS を超格子構造に組み込むことで、閃亜鉛鉱構造で成長が可能となり、わずか 5 周期の多層膜構造で 92%もの反射率を有する DBR の成長が可能になったことを示している。

第 5 章では、以上の結果をもとにワイドギャップ II-VI 族半導体では初めてモノリシックな微小光共振器構造の成長を行い、明瞭な光共振器モードを観測したことを報告している。さらに第 3 章で検討した QD を共振器に埋め込み、不均一幅を持つ QD に対して光学フォノンによる共鳴選択励起を行い、QD の電子系と共振器光場との結合状態を実現、ポラリトン混成波状態の観測について議論している。

第 6 章では、本研究における成果を総括し、今後の展望について述べている。

最後に、著者は II-VI 族ワイドギャップ半導体の特徴を生かし、モノリシック半導体微小光共振器による強い光閉じこめ場を実現、また大きな振動子強度を持つ量子ドットと結合させることに成功し、光場-電子系相互作用による発光過程の制御、高効率面発光素子への応用に関する有益な知見を得た。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 末 宗 幾 夫
副 査 教 授 武 笠 幸 一
副 査 教 授 福 井 孝 志
副 査 教 授 笹 木 敬 司

学 位 論 文 題 名

Study of Coupling between Monolithic II – VI Semiconductor Microcavities and Self-Organized Quantum Dots

(モノリシック II – VI 族半導体微小共振器と
自己組織化量子ドットの結合状態に関する研究)

光場-電子系の相互量子制御による新しい非線形量子光学現象及びそのデバイスへの応用に注目が注がれている。相互量子制御構造として代表的なものに微小光共振器がある。これは、その波長程度のサイズを持つ共振器中の光場と共振器内におかれた電子系との強い結合状態を引き起こす可能性を持つ。このとき励起子-光子の混成波として励起子ポラリトンが形成される。近年このような励起子ポラリトンに関して、低温で誘導放出を起こすことが量子井戸赤外発光層を用いた実験において確認され、励起子ポラリトンのポーズ凝縮モデルを中心とした議論が続いている。興味深いことにこの誘導放出における発振しきい値は、従来の面発光レーザの電子-正孔反転分布によるレーザ発振に比べ1桁以上も低いものであった。しかしながらこれまでの強い結合状態領域における相互量子制御の研究は、電子系を扱う半導体の励起子束縛エネルギーが小さいために、現象の観測が極低温に限られる、もしくは励起直後に自由キャリアによるスクリーニングが生じ励起子が解離し弱い結合状態に転じてしまうといった問題があった。

一方電子系を制御する新しい半導体低次元構造として、自己組織化量子ドット (QD) の研究が盛んに行われている。この QD はデルタ関数的な電子状態密度を有し、それを反映した μeV オーダーの非常に狭い発光均一線幅が単一 QD の発光として報告されている。このような共振器の共振線幅に比べはるかに鋭い発光線幅を持つ電子系を微小光共振器構造へ埋め込むと、これまではない非常に強い結合状態を引き起こすものと考えられる。しかしながらこれまでの研究では、QD のサイズ分布によって発光線幅が広がり、弱い結合状態領域における研究にとどまっていた。

本論文では、半導体微小光共振器構造をワイドギャップ II-VI 族半導体で一体化して構成することを提案し、その検討を進めている。II-VI 族半導体は大きな励起子束縛エネルギー、振動子強度をもち、また多様な材料系のゆえ高い屈折率差を有するミラーの設計が可能である。しかしな

からワイドギャップ II-VI 族半導体は高品質膜の成長が困難であることから、これまでモノリシクな微小光共振器構造は実現されていない。著者はまず、理論的に II-VI 族半導体微小共振器の可能性を探り、非常に強い光場を共振器内に閉じこめることが可能なことを示している。次に共振器内に埋め込む II-VI 族半導体による自己組織化 QD 構造の成長を検討している。これにより QD の光学的、構造的性質を明らかにし、青-緑色の発光波長を持つ QD が成長可能なことを明らかにしている。一方光共振器構造においてその構造の大半の部分を占めるのが、半導体多層膜による分布ブラッグ反射鏡 (DBR) であり、DBR の高品質化がモノリシク成長の鍵となる。本論文では、半導体多層膜 DBR 中に超格子構造を組み込むことで、低歪み、高屈折率差の II-VI 族 DBR の成長が可能であることを示している。これら II-VI 族 DBR を用いたモノリシク光共振器構造では、明瞭な光共振器の共鳴ピークを青-緑色領域において初めて観測している。またこの共振器に自己組織化 QD を埋め込み、光学的特性について評価を行っている。ここでは不均一幅を持つ QD に対して光学フォノンによる共鳴選択励起を行い、QD の電子系と共振器光場の結合状態について議論している。

以下に本論文の構成を示す。

第 1 章では、序章として本研究の背景、目的、本論文の構成について述べている。

第 2 章では、半導体微小光共振器内での光場-電子系の相互作用状態について、両者の結合の強さの程度によって現れる物理現象の違いを理論的に解説する。また実験例をもとにした強結合状態の評価方法、ごく最近報告された新しい物理現象、量子ドットと微小光共振器との結合理論について紹介する。さらに II-VI 族半導体の屈折率分散を見積もり、微小光共振器材料として II-VI 族半導体の有利性を理論的に実証する。

第 3 章では、発光層として用いる II-VI 族自己組織化 QD の成長について検討している。青色発光材料として代表的な ZnSe QD の成長を行い、光学的、構造的特性を世界に先駆け明らかにしている。また非常に強い振動子強度を有することで古くから研究されている CdS の自己組織化 QD の成長に関しても検討している。

第 4 章では II-VI 族半導体多層膜による微小光共振器用 DBR の成長の検討を行っている。このとき ZnSe をベースに、歪みの低減、屈折率差の増加を検討しながら、成長、評価を進めている。天然では岩塩構造として存在する MgS を超格子構造に組み込むことで、閃亜鉛鉱構造で成長が可能となり、わずか 5 周期の多層膜構造で 92% もの反射率を有する DBR の成長が可能になったことを示している。

第 5 章では、以上の結果をもとにワイドギャップ II-VI 族半導体では初めてモノリシクな微小光共振器構造の成長を行い、明瞭な光共振器モードを観測したことを報告している。さらに第 3 章で検討した QD を共振器に埋め込み、不均一幅を持つ QD に対して光学フォノンによる共鳴選択励起を行い、QD の電子系と共振器光場との結合状態を実現、ポラリトン混成波状態の観測について議論している。

第 6 章では、本研究における成果を総括し、今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は II-VI 族ワイドギャップ半導体の特徴を生かし、モノリシク半導体微小光共振器による強い光閉じこめ場を実現、また大きな振動子強度を持つ量子ドットと結合させることに成功し、光場-電子系相互作用による発光過程の制御、高効率面発光素子への応用に関する有益な知見を得たものであり、光エレクトロニクス分野に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格あるものと認める。